

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 25 日現在

機関番号：34407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560213

研究課題名(和文) デジタルホログラフィによる粒子流速計測法の高精度化に関する研究

研究課題名(英文) Accuracy improvement of digital holography based particle image velocimetry

研究代表者

近江 和生 (OHMI, KAZUO)

大阪産業大学・デザイン工学部・教授

研究者番号：10144536

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)： デジタルホログラフィを用いた粒子画像流速計におけるホログラム像記録の高品質化を目的として、新たな位相シフト方式の適用を考案した。すなわち参照光と物体光を独立に周波数変調する光路を構築し、ヘテロダイン干渉による位相シフトを実現することで、ホログラムの時間解像度と空間解像度を両立させた位相シフト方式が可能にした。

またホログラム像からの数値再生結果において各粒子の奥行位置を判定する方法として、粒子像の輝度ピークに対して新たな尖度パラメータを適用し、尖度最小の再生位置を粒子奥行とする方法を考案した。この手法をシミュレーションおよび実験による粒子ホログラムに適用して、ともに高精度の計測結果を得た。

研究成果の概要(英文)： Digital holography based particle image velocimetry still suffers from poor resolution of particle depth detection, partly because of the existence of imaginary twin images and DC term background image. The new idea of the present work is to use the phase-shifting interferometry based digital holography in stead of the in-line one without using the mechanical phase-shifting system. To do so it resorted to the use of a Heterodyne interferometry based phase-shifting system, which had been expected to and did work with higher capture frequency without loss of spatial resolution. Another issue of the digital holography based particle image velocimetry is the precision of the particle depth detection schemes from the reconstructed image. To overcome this difficulty, the present work introduced a new concept skewness factor regarding the morphological feature of the particle luminosity peaks and this new parameter did work successfully to measure the exact particle depth without ambiguity.

研究分野：流体力学，画像処理工学，応用光学

キーワード：デジタルホログラフィ 粒子画像流速計測法 画像計測 位相シフト干渉法 奥行計測

1. 研究開始当初の背景

デジタルホログラフィの粒子流速計測法への応用が近年大きく注目されている。その理由としては、コンパクトな単眼式の撮影系で焦点深度の極めて深い(全焦点的な)撮影画像が得られること、その特徴の逆の側面として奥行やサイズ等の3次元計測ができることが考えられる。しかし一般的なデジタルホログラフィの技術には現状で避けがたい弱点があり、それゆえ高品質の3次元画像や計測結果を得るためには高負荷の付加的な画像処理が必要である。したがってデジタルホログラフィ方式の粒子流速計測法は、通常の粒子流速計測法に比しても、さらに職人芸的な処理手順が必要となりやすく、それが手法のもつ大きな可能性に対して普及のネックとなっている側面が否めない。

2. 研究の目的

上記のような背景から、本研究ではデジタルホログラフィを用いた3次元粒子流速計測法について、再生される3次元画像の高品質化と3次元位置計測における高精度化を目的とした。高品質化と高精度化を実現するキーファクターは、ホログラムの記録過程における新しいコンセプトによる位相シフト法、そしてホログラムからの数値再生過程における新たな画像処理解析法の開発とした。また粒子流速計測法においてデジタルホログラフィを補完し得る他原理の技術として、計算機トモグラフィ法やライトフィールド画像処理法の新たな手法展開を試み、それらの長所を集約した統合化手法開発の可能性を検討することも目的とした。

3. 研究の方法

初年度の研究では周波数シフト方式を適用した位相シフトホログラフィの光路系の構築と調整から研究を開始し、続いて粒子像ホログラムの記録と数値再生を試みた。第2年度は、この新方式の位相シフトホログラフィのチューニングをさらに進める一方、粒子の再生画像からその奥行き位置を高精度かつ効率的に決定する画像解析アルゴリズムの開発と検証に研究の主眼点を移動させた。

第3年度の研究では、新方式の位相シフトホログラフィによる準実時間的な動画ホログラムの記録を開始して、粒子流速計測法による流速分布の時系列データ取得を試みた。これと並行して、粒子の再生画像からその奥行き位置を高精度かつ効率的に決定する新たな画像解析アルゴリズムの開発とその検証に研究の主眼を移行させた。ホログラム再生像から個々粒子の奥行き位置を決定する画像解析手法については数々の方法が提案

されてはいるが、その多くは再生画像における粒子近傍の画素輝度や画素輝度の微分量の奥行き方向変化を判断材料として粒子の合焦位置を決めている。これに対して本研究では、再生粒子像に対する輝度信号ピークの幾何学的形状に着目した判定量により粒子の合焦位置を決定する方法を試みた。

4. 研究成果

4-1 デジタルホログラフィの記録と再生

ホログラフィの記録においては、光源から直接進行する参照波と観察対象に反射して散乱する物体波が CCD 面上で干渉し、その干渉光の強度分布がホログラムとして記録される。このホログラムから、元の観察場の光強度分布を再生するためには、次のフレネル-キルヒホフの積分式を解く必要がある。

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R^*(x, y) \frac{\exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho\right)}{\rho} dx dy$$

ただし

$$\rho = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + d^2} \quad (1)$$

ここで $h(x, y)$ はホログラム関数であり、 ρ はホログラム面内の一点と再生面内の一点との間の距離である。積分式(1)の最後の被積分関数(点拡がり関数)の部分は、インパルス応答 $g(\xi, \eta, x, y)$ を使って次のように置き換えられる。

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R^*(x, y) g(\xi, \eta, x, y) dx dy$$

ただし

$$g(\xi, \eta, x, y) = \frac{i}{\lambda} \frac{\exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{d^2 + (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}\right]}{\sqrt{d^2 + (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}} \quad (2)$$

フーリエ変換の定義より、積分式(2)は逆フーリエ変換で置き換えることができる。さらに線形関数 $g(\xi, \eta, x, y) = g(\xi-x, \eta-y)$ の性質により、重ね合わせ積分については畳み込み定理が適用できる。よって $\Gamma(\xi, \eta)$ は、 $h \cdot E_R^*$ と g それぞれのフーリエ変換の積を求め、それを逆フーリエ変換することで計算できる。これはインライン方式のデジタルホログラフィにおける3次元像の数値再生における通例の計算手法であるが、位相シフト方式のデジタルホログラフィの数値再生においても若干の変更によりそのまま適用可能である。

4-2 実験装置と手法

本研究で試みた新方式の位相シフトデジタルホログラフィの記録過程における装置の概略を図1に示す。図1において、光源である He-Ne レーザは波長 632.8nm、出力 5mW

の赤色レーザである。光源を出たレーザ光は、1 対のハーフミラーとフルミラーによって 2 本の平行ビームとなり、これがそれぞれホログラフィの参照光と物体光となる。これらのビーム光は、それぞれ独立の A0 変調器 (AOM) により周波数変調される。

ここで参照光と物体光のビーム光の間に 変調周波数の微差を与えることにより、ヘテロダイナミクスの原理によって、画像センサに到達する両者の波面には周期的な位相ずれが発生する。このとき変調周波数の差を、画像センサである CCD カメラのフレーム周波数の 1/4 に設定すれば、CCD カメラの各フレームには物体光と参照光の位相が $\pi/4$ ずつシフトしたホログラム像が時系列的に記録される。これが本研究における新たな位相シフト方式である。

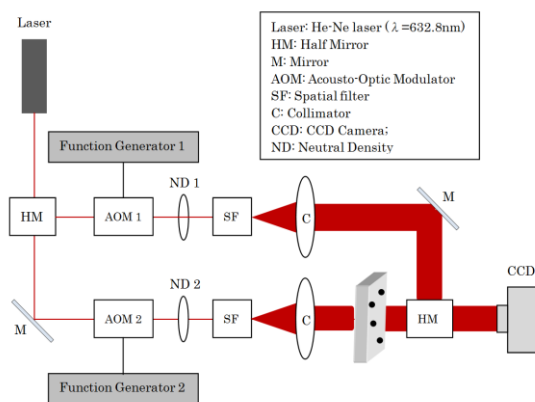


図 1 位相シフトホログラム記録用の光学系

4-3 実験結果

通常のインラインデジタルホログラフィでは、積分式 (1) に示すように記録したホログラム像それ自体をフレネル・キルヒホフ積分して再生像を計算する。これに対して位相シフトデジタルホログラフィでは、ホログラム像を直接フレネル・キルヒホフ積分するのではなく、参照光と物体光の位相を段階的に変化させて記録した複数のホログラム像から、物体光の振幅と位相分布を数値的に求め、それにより決定する物体光の複素振幅をフレネル・キルヒホフ積分して再生像を計算する。

本研究の位相シフト方式では、参照光の位相を $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ とシフトさせた 4 面のホログラム像を順次撮影し、それらから物体光の位相分布を次式により求める。

$$\varphi_0(x, y) = \tan^{-1} \frac{I_{3\pi/2}(x, y) - I_{\pi/2}(x, y)}{I_0(x, y) - I_{\pi}(x, y)} \quad (3)$$

次に光路における参照光を遮断してホログラム像を撮影し、そこから物体光の振幅分布 $a_0(x, y)$ を実験的に求める。物体光の位相と振幅が求まることにより、物体光の複素振幅も直接計算される。この複素振幅をホログラム関数に代えて式 (2) によりフレネル・キル

ヒホフ積分することにより、0 次回折光等の影響がない再生像を計算することができる。以下、図 2 は参照光と物体光の位相を $\pi/2$ ずつシフトさせて記録した 4 面のうち 2 面のホログラム像である。ここでの観察対象は、スライドガラス上に固定されたマイクロ粒子 (粒径 $125\mu\text{m}$) である。

これらの画像から数値的に求めた物体光の複素振幅をもとに、式 (2) を用いて計算したスライドガラス上の粒子の再生像を図 3 に示す。この図の結果は、数値再生における再生像の奥行位置を 1mm ずつ変化させた結果の一部を示しており、一連の再生像の結果から粒子像の合焦位置は奥行 140mm の位置であることが目視で観察される。この合焦位置の結果は、粒子から CCD 表面までの実測距離に比べて 1mm 浅い位置であるが、実測値の誤差等を考慮すれば妥当な値と考えられる。また比較実験として同一条件で行ったインラインホログラフィによる粒子の合焦位置の結果に比しても実測値に近い結果となった。

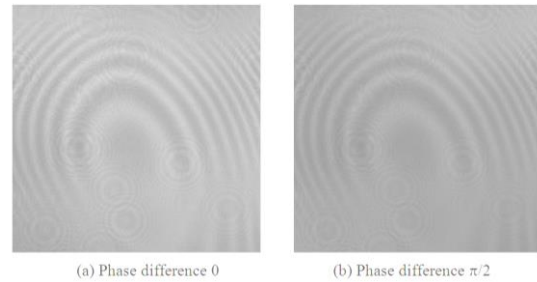


図 2 位相シフトホログラフィにより記録された粒子像

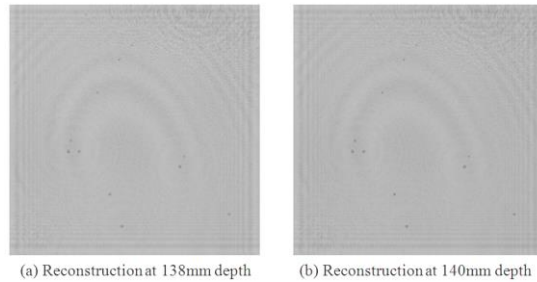


図 3 位相シフトホログラフィの再生結果

4-4 粒子奥行位置の自動評価方法

上記で述べた位相シフト方式のデジタルホログラフィの応用実験において、粒子の奥行位置を評価するための合焦位置の判定は実際の再生画像に対する目視で行った。しかし粒子画像流速計測のシステムにおいて、多数の粒子の合焦位置を目視で判定するのは非現実的であり、数値再生した粒子画像の様々な特徴から合焦位置を画像処理により自動判定することが必須である。

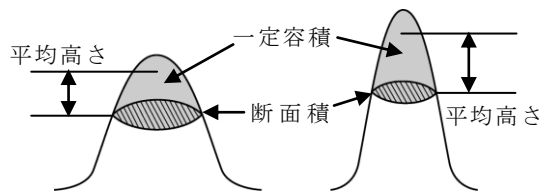
そのような観点から、デジタルホログラフィの数値再生結果から粒子等の奥行位置を自動評価するための様々な手法が以前から

試みられている。その中で比較的頻繁に使用されるのが粒子中心付近での輝度変化を解析する方法であり、再生時の深さ変化に対して単純に輝度が最小値となる位置を求める方法や、輝度の奥行方向に対する微係数を解析する方法などが知られている。また、その他の自動評価法として、数値再生計算における虚数部の画像における粒子振幅を基準にする方法、粒子像の記録時における位相情報を復元し、そこから粒子の奥行位置を見積る方法等も知られているが、いずれも実験条件的に様々な制約があり、粒子位置の一般的な奥行計測には問題が多い。

これに対して本研究で試みた奥行位置計測法は、各粒子像の輝度ピークにおける幾何的な形状特質を基準にする方法であり、中心輝度の変化解析法に比べて合焦位置の判定が曖昧になるケースが少ないこと、再生像の背景中の残留ノイズや再生像の微細な位置シフトにも影響を受け難い等の特徴を持つ。

4-5 自動評価の原理

本研究の新たな奥行評価法では、粒子像の輝度ピークを高さ方向に輝度分布を持つ3次元的な立体と考え、その立体の幾何的な特質をベースに合焦位置の判定を行う。その判定の基準は、輝度ピークを表す立体のナロー性であり、それを具体的に数値化したパラメータとして輝度ピークの尖度を定義する。この尖度は、各々の輝度ピークを容積一定の条件で切り出した際の、切断断面積と切断面からの平均高さの比で定義し、この尖度が最小になる数値再生の奥行位置を、その粒子の奥行と評価した。図4はこの新手法における輝度ピークの形状変化の特徴と、尖度の定義方法を模式的に示したものである。



(a) 焦点外のピーク (b) 合焦点のピーク

図4 輝度ピークの形状特質と尖度

4-6 シミュレーション画像による結果

第一段階の実験として、球状の粒子に対するフレネルの回折式を用いて粒子ホログラムのシミュレーション画像を生成し、そのシミュレーション画像に対する数値再生結果から、奥行評価に関する提案法の性能を検証した。ホログラム面の光強度分布 $I(x, y)$ は

$$I(x, y) = I_0 - \sum_{k=1}^n \alpha_k g_k(x - x_k, y - y_k) + I_{bg}(x, y) \quad (4)$$

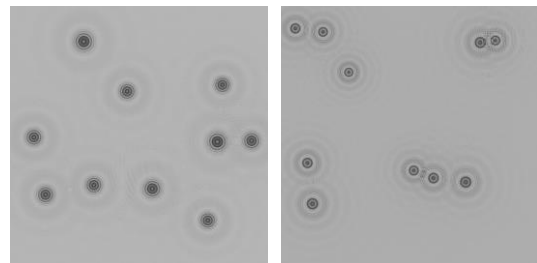
ただし

$$g_k(x, y) = \frac{\pi r_k^2}{\lambda z_k} J_{1c} \left(\frac{2\pi r_k \sqrt{x^2 + y^2}}{\lambda z_k} \right) \sin \left(\frac{\pi(x^2 + y^2)}{\lambda z_k} \right)$$

ここで x, y, z は3次元位置座標であり、 r は観察対象の粒子の半径である。 α_k は k 番目の粒子像回折の振幅係数、 I_0 は画像センサへの入射光強度、 I_{bg} は背景ノイズの光強度である。また関数 $g_k(x, y)$ は球状粒子の回折パターンであり、式中の λ はレーザ光の波長、 $J_{1c}(x)$ は $J_{1c}(x) = J_1(x)/x$ の関係で与えられ、 J_1 は第1次ベッセル関数である。

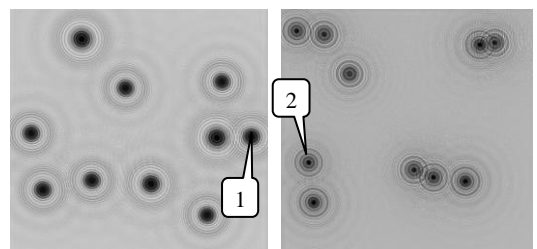
図5は上記の手法により数値的に生成した10個の粒子のホログラム画像である。計算中で使用した粒子直径は $30\mu\text{m}$ または $60\mu\text{m}$ 、レーザ光の波長は 632.8nm である。また10個の粒子は 40mm から 65mm の奥行範囲にランダムに発生させた。このホログラム像の解像度は 512×512 画素であるが、数値再生におけるラップアラウンド誤差を低減するため、画像計算のワークサイズを 1024×1024 画素とし、中心部の 512×512 画素のホログラム像の周囲に対して輝度平均値によるパディングを行った上で、数値再生の計算を行った。

この粒子ホログラムからの数値再生像の計算は奥行方向に 0.2mm ステップで行った。図6は数値再生像のうち $30\mu\text{m}$ 粒子と $60\mu\text{m}$ 粒子の場合の結果を1例ずつ示しており、 $30\mu\text{m}$ 粒子再生像の番号1の粒子は奥行評価で 53mm 、 $60\mu\text{m}$ 粒子再生像の番号2の粒子は奥行 56mm と、それぞれホログラム生成時の奥行に等しい判定結果が得られた。



(a) 直径 $30\mu\text{m}$ (b) 直径 $60\mu\text{m}$

図5 シミュレーションによる粒子ホログラム



(a) 奥行 53mm ($30\mu\text{m}$) (b) 奥行 56mm ($60\mu\text{m}$)

図6 ホログラムからの再生像の計算結果

この奥行位置の判定において、判定基準とした尖度パラメータの値の再生奥行に対する変化の様相 ($30\mu\text{m}$ 粒子の場合) を図7に示す。

これらの変化曲線から明らかなように、本研究における新たな尖度パラメータは、粒子の合焦位置である奥行においてシャープな最小値を示しており、同じ図中に参考のために示した他の尖度パラメータ(輝度ピークを容積一定の条件で切り出した際の切断断面積をそのまま尖度としたもの)による結果に比しても、不確実性の少ない奥行判定が可能であることが確かめられた。

図8は、粒子のホログラム像生成時の理論上の奥行と、再生画像に尖度パラメータを適用して得られた再生奥行との相関関係を示したものである。ホログラム生成時の粒子の理論上の奥行位置は40~65mmの範囲である。この図から明らかなように、数値シミュレーションによるホログラム像を使った実験では、理論上の奥行と再生画像からの奥行の一致の度合いは計測領域で非常に高いことが確かめられた。

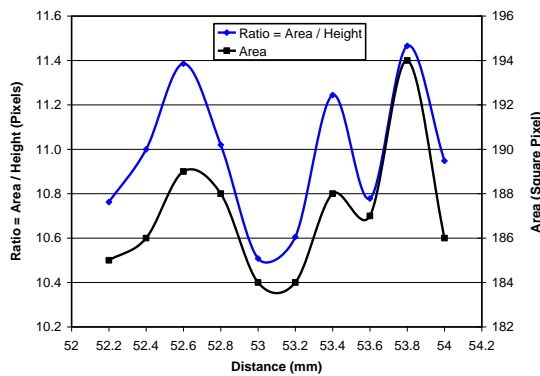


図7 再生時の奥行による尖度パラメータの値変化 (30 μm 粒子の場合)

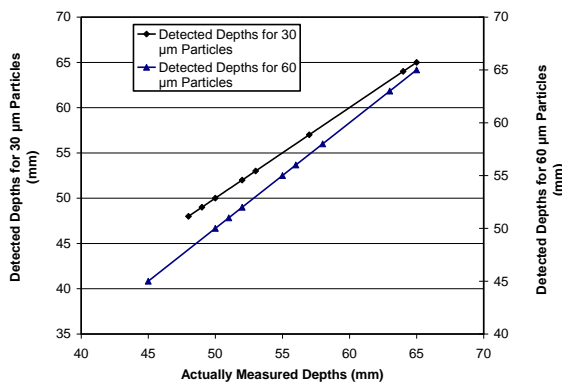


図8 粒子の実際の奥行と再生画像から判定した奥行との比較

4-7 実験粒子画像による結果

第二段階の実験として、実際の小水槽中にシード粒子を浮遊させ、内部の水を電磁スターラでゆっくり回転させながら、粒子の模様をホログラム画像として記録した。そのホログラム像から数値再生と合焦位置の判定を行って粒子奥行の評価を試みた。実験に用い

た小水槽のサイズは $156 \times 81 \times 16 \text{ mm}^3$ であるが、このうち中央部の $5.32 \times 5.32 \times 16 \text{ mm}^3$ を観察領域とした。またシード粒子として平均粒径 $60 \mu\text{m}$ のオルガソル粒子を用い、光源は出力 8 mW の He-Ne レーザ、光源波長は 632.8 nm とした。

ホログラム像の記録は 1024×1024 画素で 8 bit 解像度の C-MOS カメラを用いて、水槽前面から 41 mm の奥行位置で行った。なお、この C-MOS カメラの画素サイズは $5.2 \times 5.2 \mu\text{m}^2$ である。図9に、この実験装置で記録した代表的な粒子ホログラム像を示す。数値シミュレーションによる粒子ホログラム像の再生計算の場合と同様、実際の流体実験における粒子ホログラム像の再生計算でも、記録したホログラム像は画素サイズを原画像の2倍の 2048×2048 画素に拡張し、周辺の拡張部画素をホログラム像の平均輝度でパディングして、 41 mm から 57 mm の奥行範囲を 0.2 mm ステップで再生計算した。一例として図9のホログラム像に対して、奥行 50 mm における再生計算で得られた再生像を図10に示す。

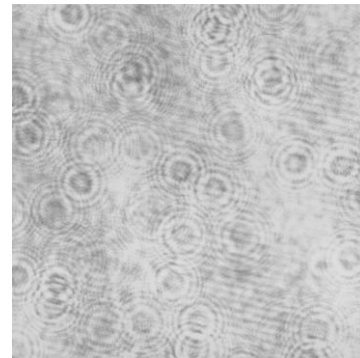


図9 小水槽中の浮遊粒子のホログラム像

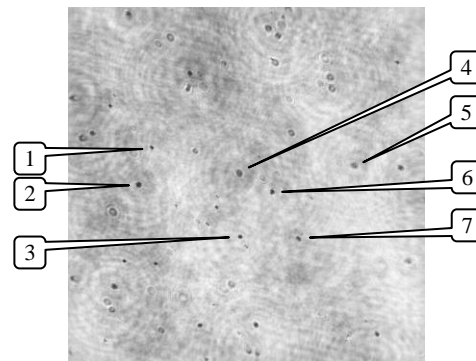


図10 奥行 50 mm における粒子の再生像

さらに手法の有効性を検証するため、図10の再生像における粒子の番号1から7についてその奥行計測を行ったところ、それら計測値として $49.2, 50, 50, 44.8, 46.8, 51, 48 \text{ mm}$ という結果がそれぞれ得られた。これらの測定値は、実際の水槽内で水が分布する奥行範囲にあることは無論、視覚的に認識される粒子の奥行方向の分布傾向とも定性的に

一致しており、その限りにおいて本実験における粒子の奥行計測結果は満足すべき精度を備えていると考えることができる。

また本研究の奥行評価法における尖度パラメータの性能を実験画像による数値再生でも検証するため、図 10 の番号 1 の粒子について、尖度パラメータの再生奥行に対する変化の様子を調べた結果を図 11 に示す。なお比較参照のため、この図においても以前の尖度パラメータによる変化の様子を示した。この図から明らかなように、以前の尖度パラメータにおいては 49mm と 49.2mm の 2 箇所において同時に発生している尖度最小値が、本研究の新たな尖度パラメータによる判定では 49.2mm のみにおいて最小値となっており、実験画像に対する測定例においても、新たな尖度パラメータの有用性が確かめられた。

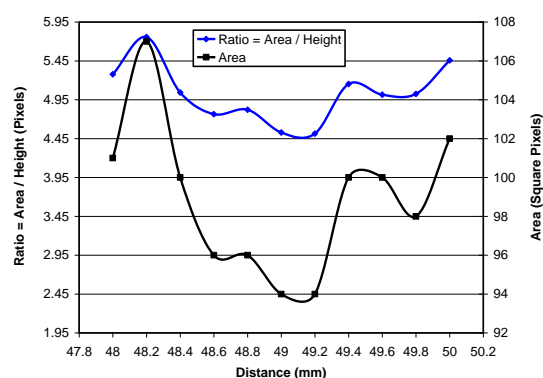


図 11 再生時の奥行による尖度パラメータの値変化 (実験粒子画像の場合)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

(1) Basanta Joshi, Kazuo Ohmi, Kazuo Nose: Comparative study of camera calibration methods for 3D particle tracking velocimetry, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, vol. 9, no. 5, pp. 1971-1986, 2013.

(2) Basanta Joshi, Kazuo Ohmi, Kazuo Nose: Novel Algorithms of 3D Particle Tracking Velocimetry Using a Tomographic Reconstruction Technique, Journal of Fluid Science and Technology Vol. 7, No. 3. pp. 242-258, 2012

[学会発表] (計 10 件)

(1) Kazuo Ohmi, Chuanqi Cao, Sudat Tuladhar: Quasi real-time hologram recording technique in phase-shifting digital holography, Proc. 9th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, #001, 2014

(2) Kazuo Ohmi, Alharbi Alaa, Sudat Tuladhar: Streak Image based 3D Tomographic Velocimetry applied to a Water Flow past

a Submerged Square Cylinder, Proc. 17th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, #3. 5. 5, 2014

(3) Kazuo Ohmi, Chuanqi Cao, Sudat Tuladhar: Particle depth detection based on a novel technique of phase shifting digital holography, Proc. 15th International Symposium on Flow Visualization, #1261, 2014

(4) Kazuo Ohmi, Aljabri Sultan, Alharbi Alaa, Basanta Joshi: 3D flow structure of the wake of a submerged square cylinder by the use of novel tomographic image velocimetry, Proc. 8th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, A0034, 2013

(5) Kazuo Ohmi, Basanta Joshi, Aljabri Sultan, Alharbi Alaa: Particle path based tomographic image velocimetry, Proc. 10th International Symposium on Particle Image Velocimetry, A160, 2013

(6) Kazuo Ohmi, Basanta Joshi: Tomographic reconstruction technique for PIV flow measurement, Proc. 2nd International Conference on Engineering and Applied Science, #1499, 2013

(7) Basanta Joshi, Kazuo Ohmi, Kazuo Nose: SOM based Particle Matching for Volumetric Particle Tracking Velocimetry, Proc. 14th IASTED International Conference on Computer Graphics and Imaging, #798-115, 2013

(8) Kazuo Ohmi, Basanta Joshi, Chuan-Qi Cao: Effect of Camera Calibration Method in the 3D Tomographic PIV Proc. ISEM-ACEM-SEM 7th ISEM'12 Joint Conference, I103, 2012

(9) Basanta Joshi, Kazuo Ohmi, Kazuo Nose: Particles detection scheme for tomographic particle tracking velocimetry, Proc. 16th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, #1. 5. 4, 2012

(10) Kazuo Ohmi, Sanjeeb Prasad Panday: Novel Techniques in Digital Holography Based Particle Tracking Velocimetry, Proc. 8th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, GSF30-003, 2012

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近江 和生 (OHMI KAZUO)

大阪産業大学 デザイン工学部 教授

研究者番号: 10144536

(2) 研究分担者

()

研究者番号: